



Development and Qualification of an FPGA-Based Multi-Processor System-on-Chip On-Board Computer for LEO Satellites

著者	Mohamed Mahmoud Mohamed Ibrahim
発行年	2014-09-26
その他のタイトル	低軌道衛星のためのFPGAを用いたマルチプロセッサシステムの開発と検証
学位授与番号	17104甲工第374号
URL	http://hdl.handle.net/10228/5308

氏 名	Mohamed Mahmoud Mohamed Ibrahim(エジプト)
学 位 の 種 類	博 士(工学)
学 位 記 番 号	工博甲第374号
学位授与の日付	平成26年9月26日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学 位 論 文 題 目	Development and Qualification of an FPGA-Based Multi-Processor System-on-Chip On-Board Computer for LEO Satellites (低軌道衛星のためのFPGAを用いたマルチプロセッサシステムの開発と検証)
論 文 審 査 委 員	主 査 准教授 浅海 賢一 教 授 趙 孟佑 " 奥 山 圭一 准教授 豊田 和弘 " 三 浦 元喜

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

超小型衛星の開発が科学・商用目的でこの十年間急速に活発化している．そのオンボードコンピュータは、様々なミッションに柔軟に対応することが求められると同時に、1) 低コスト、2) 演算能力、3) 十分な信頼性、4) 低消費電力のバランスをとることが重要となる．さらに開発期間の短縮化と効率化のため、地上民生品（COTS, Commercial Off-The-Shelf）を利用した情報処理系の設計開発と試験方法の確立が求められている．本研究では、COTS品として容易に入手可能な再構成可能な集積回路であるFPGA（Field Programmable Gate Array）を用いたマルチプロセッサシステム（MPSoC）を構築し、評価ボードに対して放射線照射試験及び熱真空試験を行い耐故障性能の検証を行った．

本論文は全8章で構成されている．

第1章は、超小型衛星を取り巻く社会環境、オンボードコンピュータに求められる要件と再プログラミング可能デバイスの可能性を生かした具体的な研究方針について述べている．

第2章は、本研究の背景を説明している．低軌道の宇宙空間で電子デバイスに発生するシングルイベント効果の特徴を述べるとともに、時間的・空間的冗長化による耐故障システムの概要を説明している．また既存の自己回復機能に関する研究では明確に示されていなかった試験方法の実証やコスト対性能比の優位について述べている．

第3章は、FPGAを用いたマルチプロセッサシステムの設計について説明している．耐故障システムの基本的手法をハードウェアとソフトウェアの両方の観点から分類し、予期されるソフトウェアに対する単位時間あたりの平均故障発生数（Failure In Time）と平均故障間隔（Mean Time Between Failures）を見積もるためのアーキテクチャ・モデルを提案している．低軌道での運用時におけるシミュレーション評価の結果、FPGAの動的再構成技術を用いたスクラビング戦略を導出してマルチプロセッサシステムに信頼性を付加した．集積回路設計の

規模と消費電力を解析し、オンボードコンピュータとして想定される利用方針を示した。

第4章は、時間的・空間的冗長化のトレードオフを考察している。目標とする軌道におけるシングルイベントアップセットの発生率を模擬した上で、耐故障システム・アーキテクチャ毎の演算性能のベンチマークテストを行っている。さらに、信頼性の算出のために巡回冗長検査 (Cyclic Redundancy Check) による評価モデルを構築し、最悪ケース信頼度 (Worst Case Reliabilities) の比較を行い、開発したMPSoCが低軌道衛星用の耐故障システムとして十分に運用可能であることを示した。

第5章は、評価ボードを用いた放射線照射試験についての実験結果をまとめている。高崎量子応用研究所で実施したプロトン照射試験の手順を説明し、測定結果からスクラビングによるシングルビット反転現象の緩和が可能であるとの結論を得ている。マルチビット反転現象に対してはフルリセットによるシステム復旧を必要としたが、その発生確率は非常に少ないことを明らかにした。

第6章は、評価ボードを用いた熱真空試験についての実験結果をまとめている。MPSoCのクロック周波数とコア数を再構成する能動的温度管理手法とヒートシンクを用いた受動的手法を組み合わせた実験を行い、低軌道でのCOTS FPGAの運用に対する評価を行った。

第7章は、前章までの結果をまとめるとともに、MPSoC設計と耐故障性のために開発したアルゴリズムについて考察している。

最後の第8章では、本研究で得られた主要な結論をまとめるとともに、本研究の更なる発展を目指し、FPGAベースのMPSoCシステムに対する環境試験の将来を展望している。

学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、民生品FPGAを用いた超小型衛星のためのMPSoC設計を提案し、低軌道における運用を想定した信頼性シミュレーションと環境試験の結果から、低コストかつ高演算性能を有するオンボードコンピュータの可能性を示す研究であり、宇宙開発へ応用可能なコンピュータアーキテクチャ分野の発展に寄与するところが大いと考えられる。

また、本論文に関する公聴会において、審査委員および出席者から、能動的温度管理手法の利点、他の環境試験への展開、次世代デバイスへの応用などに関して質問がなされたが、いずれも著者からの的確な回答がなされ質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。